

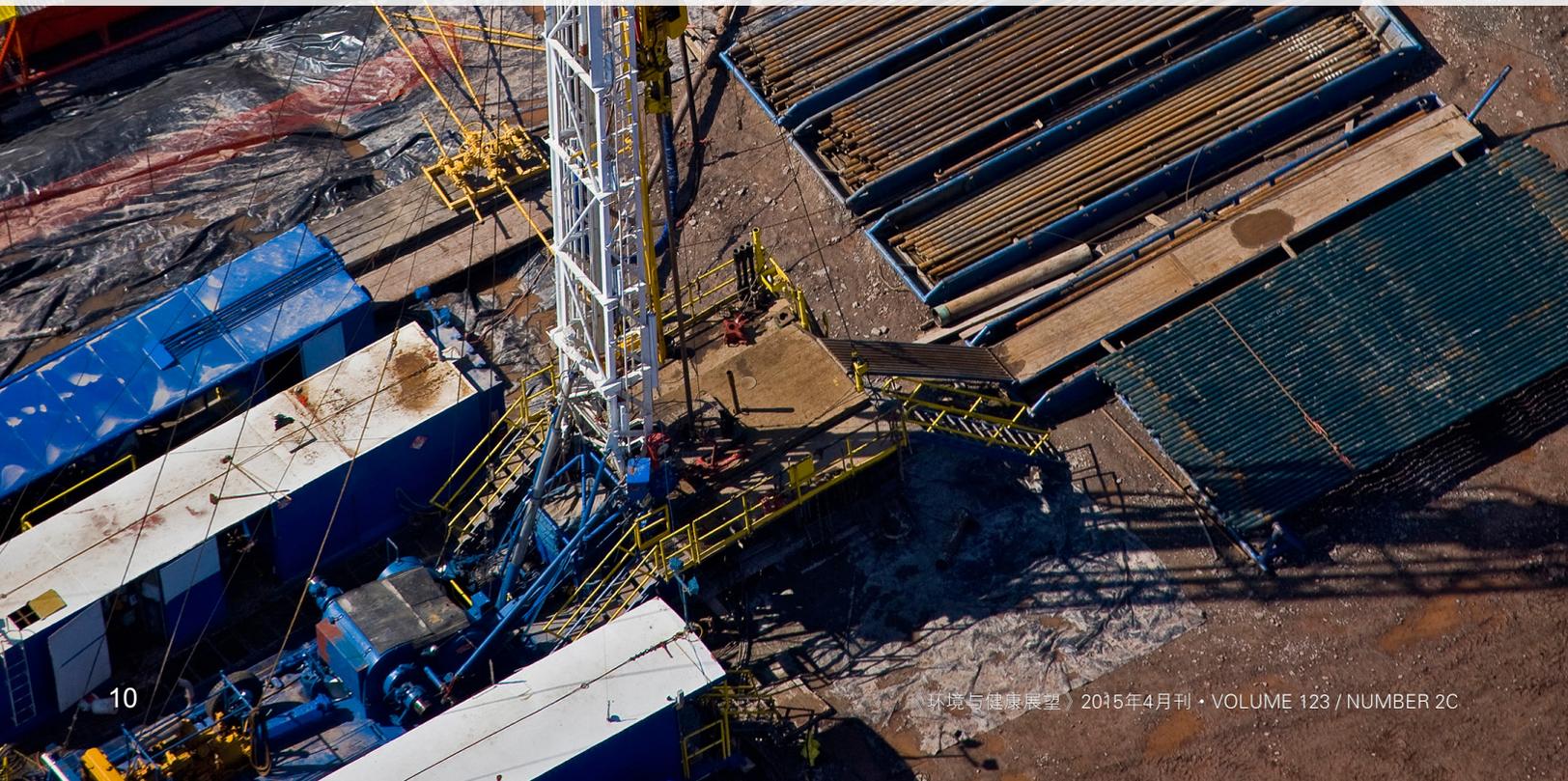


# 水力压裂废水中的 放射性核素

## 管理有毒混合物

在宾夕法尼亚州迪莫克一处水力压裂施工现场，一座被围起来的蓄水池用来储存废物。

© J. Henry Fair



天 然存在的放射性核素广泛分布于地壳中，所以无论传统还是非传统的矿物和烃类提取过程中通常都会产生一些放射性废物，这不足为奇。放射性钻井废物是一种 TENORM（“人为增加的天然放射性物质” technologically enhanced naturally occurring radioactive material 的缩写）——即，经过浓缩或通过其他人为手段使得人类暴露更多的天然放射性物质（NORM）。美国天然气钻井兴起的速度和范围对放射暴露和废物处理提出了更严格的审查标准。

也许在钻井废物的问题上，没有哪个地方比宾夕法尼亚州更突出，该州采用液压破裂（水力压裂）法对马塞勒斯页岩进行天然气开采，使该州成为美国 2011 至 2012 年间发展最迅速的生产地。据美国地质调查局地质学家 Mark Engle 介绍，马塞勒斯以铀矿含量高著称。他说，镭-226（铀的衰变产物）的浓度在页岩深处的浓缩盐水中可能超过每升 10000 微微居里（pCi/L）。

目前，钻井行业和监管人员认为放射性废物对工人和公众的风险很小。宾夕法尼亚州环境保护部（PADEP）的信息专家 Lisa Kasianowitz 说，目前没有证据“表明公众和工人面临这些物质所致的任何辐射暴露风险”。但由于缺乏大量数据，这种安慰对于公共卫生人员而言并无多大意义。

**废物采出和储存**

经水力压裂后，气体和液体——包括注入的水和任何滞留在地岩层的水（称之为“回流”和“采出水”）——被抽出地表。页岩中的液体是远古海水的残余。页岩水中的盐经过数百万年的时间达到了极高的浓度，与周围岩石发生化学反应后能释放放射性核素。有多项研究表明，通常页岩水含盐量越高，其放射性越强。

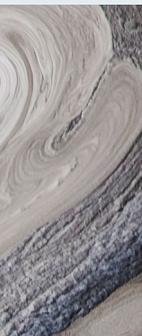
溶解的化合物通常从页岩水中析出，在管道内形成充满放射性核素的“水垢”。为了去除这些堵塞管道的水垢，操作人员会灌注化学物质来溶解它。水垢也可以通过机械方法去

俄州只要求必须是“不漏液体的”深坑。然而，不合适的塑料内衬可能会裂开，有报道称宾夕法尼亚州和其他地方发生过深坑的塑料内衬裂开和溢出。

2013年对德克萨斯州巴内特页岩地区储存池的一项小型研究建议对水坑安全性评估进行斟酌。调查人员测定了镭——这种放射性核素通常作为判断NORM废物是否符合废弃物监管指南的指标——以及其他7种未经定期检测的放射性核素。尽管各放射性核素符合现存监管指南的要求，但有一个样本中的β总放射超过监管限制的8倍。“暴露监管指南指出，评估单个镭放射性核素，而非考虑所有的

理厂，再被排放到河水和溪流中，其中很多还作为饮用水供给。同年4月，PADEP要求所有马塞勒斯页岩的水力压裂作业停止把废水送至处理厂，Kasianowitz说。虽然这是非强制性的，但这一要求使大多数生产商开始直接重复使用绝大部分的采出水，或者经过具备处理污染物资质的专门商业性处理厂处理后再进行重复使用。

由地理化学家Avner Vengosh领导的杜克大学研究团队试图了解一个污水处理厂——宾夕法尼亚州西南部的约瑟夫盐水处理厂——所排放的污水的特征。研究人员比较该厂上游和下游沉积物中的放射性和溶解物，发现



**采用液压破裂（水力压裂）法对马塞勒斯页岩进行天然气开采，使宾夕法尼亚州成为美国2011至2012年间发展最迅速的生产地。马塞勒斯以铀矿含量高著称；镭-226（铀的衰变产物）的浓度在页岩深处的浓缩盐水中可能超过10000 pCi/L。**

除，如使用钻机、炸药、射流，此过程中带来了大量的固体废物。

废物通常临时储存于废物箱或地表蓄水池，亦可称之为深坑和水塘。有关用于页岩天然气开采的水塘的数据非常少，但据Kasianowitz介绍，宾夕法尼亚州有25座集中式蓄水池。集中式蓄水池的规模如同一个足球场，可以容纳至少1亿加仑液体。尽管较小水塘的数量可能更多，但她说这些临时性的废物池主要用于钻井开发的早期并且很快就被弃用。

大多数蓄水池都铺设塑料薄膜。宾夕法尼亚州要求临时蓄水池和处理池的塑料内衬的厚度不小于30毫米英寸，并且接缝处密封以防泄露。俄亥

放射性核素，可能会低估对工人、公众和环境的潜在放射暴露，”作者写到。

**地表水体**

基本上绝大多数废水不是经过处理后重复使用，就是被送至二类注水井（废弃物或升级采收井）。一小部分宾夕法尼亚州的水力压裂废水仍是经过处理后被排放到地表水体中，除非在更严格的新处理标准下有新的处理厂许可证，Kasianowitz说。

最近，对于马塞勒斯NORM的关注集中在宾夕法尼亚州的地表水体。原因在于，2011年前，大部分采出水是先被送至商业性或公共废水处

理厂，再被排放到河水和溪流中，其中很多还作为饮用水供给。同年4月，PADEP要求所有马塞勒斯页岩的水力压裂作业停止把废水送至处理厂，Kasianowitz说。虽然这是非强制性的，但这一要求使大多数生产商开始直接重复使用绝大部分的采出水，或者经过具备处理污染物资质的专门商业性处理厂处理后再进行重复使用。

由地理化学家Avner Vengosh领导的杜克大学研究团队试图了解一个污水处理厂——宾夕法尼亚州西南部的约瑟夫盐水处理厂——所排放的污水的特征。研究人员比较该厂上游和下游沉积物中的放射性和溶解物，发现

污水中的放射性下降了90%。放射性成分并非消失了，作者认为大部分很可能发生迁移并以高水平蓄积在沉积物中，而沉积物会被转移到废物填埋场。

排放点河流沉积物中的放射水平也很高，虽然不流入下游地表水，但在当地的食物网中具有生物蓄积风险。排放点的外流沉积物的放射水平是上游沉积物的200倍。该研究特别强调，“很多其他地方的河流和池塘沉积物中可能存在镭蓄积，这些地方的水力压裂液可能会被排放到环境中，”Vengosh说。

该研究也显示了经处理盐水对水质的另一个潜在影响。大部分采出水

含有溴化物，可能与天然存在的有机物质和含氯消毒剂结合形成饮用水污染物，三卤甲烷。这些化合物与肝、肾及神经系统障碍相关。杜克大学的研究人员报道，该处理厂下游1英里处的溴化物浓度大幅升高——这是下游饮用水处理厂未来的潜在负担。

### 深层灌注

2011年政策改变后，俄亥俄州的二类注水井开始接收宾夕法尼亚州的最终废水。宾夕法尼亚州的地质并不适合使用这种方法，该州仅有6座注水井可用，而俄亥俄州有177座，德克萨斯州有5万座。

二类注水井将废水储存在含有可

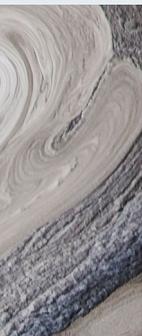
的油井，情况更是如此。

另一项研究表明，地岩层水可能通过自然途径迁移到淡水层中。尽管这些途径不是由天然气钻井引起的，但该研究作者认为这些特征可能使某些地方更易受到水力压裂所致的污染。

当被问及深层注水井的完整性时，Vengoshi说，“据我所知，没有人真正进行检查。”如果发生泄漏，他说，很大程度上要取决于它们是如何与饮水层连接的。“不同于沉积物镭所蓄积的淡水系统，”他说，“如果含盐量高且有还原条件，镭会在水中溶解并随水流动。”

镭在土壤中的表现可能与预期不同。当他们在实验室中把形成水垢的镭和重晶石与密西西比州典型的土壤样本混合，镭逐渐从重晶石上溶解，这可能是土壤微生物作用的原因。“这一结果，”作者写道，“表明应当重新审查处理水垢的还田方式。”

固体和淤泥也可以被送到填埋场。城市垃圾填埋场的放射性限值由各州设定，从5~50 pCi/g不等。Kasianowitz说，自2001年宾夕法尼亚州开始要求在城市垃圾填埋场安置放射监测仪后，水力压裂淤泥和固体中就很少产生放射。2012年，它们仅占0.5%的监测警报。它们“所含的放射性水平不会真正对公众产生伤



**“如果每一件事都按照理想的方式做，那么这种放射性在宾夕法尼亚州环境中的影响就会降到最低……唯一可能的途径是事故、溢出或泄漏，”匹兹堡大学土木与环境工程教授Radisav R. Vidic说。但他补充到，“这种事在每一个行业都会发生，所以无法阻止它发生。”**

用地下水的岩层之下。通常，行业认为这能够防止污染物迁移到浅层淡水区域中。

但一些人认为这可能是一个有缺陷的假设。水力压裂能把气体从岩石下抽出来的原因，也正是部分观察家认为注水井可能不稳定的原因——灌注所致的强压需要近一年的时间才能消失，水文顾问Tom Myers说，他在2012年发表了一篇水力压裂液地下行为的模拟研究。

Myers表示，长时间高于正常值的压力会使地岩层水体以及水力压裂用化学物质更快地接近地表，而自然的地质时间跨度可能需要上千年。如果水力压裂区内发生断层和/或有废弃

### 合理使用和填埋

水力压裂废物也可通过“合理使用”的方式处理，包括把采出水作为道路除冰剂，把钻井岩屑用于道路养护，把液体或污泥洒在田地里。宾夕法尼亚州允许在拥有该州许可的情况下把水力压裂盐水用于道路防尘和防冰。该许可对诸多成分都设置了许可范围，但不包括放射性。

通常认为填埋场中的镭具有稳定性，这是基于其与重晶石（硫酸钡，钻井废物中一种常见的成分）反应的假设。然而，密西西比州矿物资源研究所的Charles Swann及同事们发现有证据表明，分散在田地里的废物中的

害，”2012年由非营利性的石油和天然气环境法规州审查团（State Review of Oil and Natural Gas Environmental Regulations）撰写的一份有关宾夕法尼亚州水力压裂作业的报告上写到。PADEP放射预防局局长Dave Allard指出，这是因为所有土壤都某种程度上有放射性，“你总是会找到镭、钍和铀，因为这些填埋场就在土壤上。”

### 评估暴露

在联邦层面，几乎所有的监管程序都不包括放射性油气废物，而普通公众希望能够对其进行治理。《原子能法案（1954）》（Atomic Energy Act of 1954）和《低水平放射性废物政策

法案》(Low-Level Radioactive Waste Policy Act)都不包含NORM。美国核管理委员会没有权利管理放射性油气废物。各州法律不尽相同。尽管1989年职业安全与健康管理局的安全公告中提到,NORM暴露源“在过去可能未受联邦和各州机构重视,工人只是得到一点联邦放射保护。”

马塞勒斯的水力压裂发展非常迅速,以致公众对其放射性结局的了解和研究已显滞后,并且有关其人类健康风险的程度和大小也存在诸多疑问。“我们很担心人们的饮水中(可能)含有镭-226,”宾夕法尼亚州西南部环境健康项目的公共卫生毒理学家David Brown说。“当有人打电话给

Christopher Impellitteri说。

该项EPA研究包括评估地表泄露、深井注水、经处理的水力压裂废水排放对饮水资源的潜在影响。其中一个研究项目是模拟接纳水体中待处理溢出污染物的运输,包括镭。现场研究和实验室研究都会描述废水处理和重复利用过程中污染物的归趋和运输。采集地下水样本,检测镭-226、镭-228、总 $\alpha$ 和 $\beta$ 放射。整体研究不包括氡。

氡和镭都会放射 $\alpha$ 粒子,其吸入和摄入所致的危险性最大。氡一旦吸入就会导致肺癌,有证据表明氡也可能引起其他癌症,如血癌。通过饮用水摄入镭会引起淋巴瘤、骨癌和

## 假设之外

有关质量控制的假设很大程度上是基于这一争议:水力压裂的风险是否大于收益。“如果每一件事都按照理想的方式做,那么这种放射性在宾夕法尼亚州环境中的影响就会降到最低,因为他们重复利用水,”匹兹堡大学土木与环境工程教授Radisav R. Vidic说。“唯一可能的途径是事故、溢出或泄漏。”他补充,“这种事在每一个行业都会发生,所以无法阻止它发生。”

Vengosh说,PADEP的确报道了上百起有关水力压裂液的溢出和污染事件。另外,他说“由于废水会发生化学反应,行业中重复利用所有回流

**目前对于放射性水力压裂废物在环境中的归趋和影响的了解尚不全面,因此无法对管理作出妥善的决定。而且即使马塞勒斯的水力压力作业一夜之间全部停止,有关放射性的疑问和潜在问题仍然不会消失。“一旦把水力压裂液排放到环境中,就会有放射性遗留下来,”杜克大学的研究员Vengosh说。**

我们问“我们的饮用水安全吗”时,我的回答是“我不知道”。

PADEP正在研究放射性水力压裂废水潜在暴露的程度。PADEP研究的样本为钻井岩屑、采出水、泥土、废水回收和处理淤泥、过滤网、开采的天然气、油井套管和管道中的结垢、废物运输设备。PADEP也会评估油井场、废水处理厂、废水回收厂和填埋场中的放射性。

美国环保署(EPA)也正在研究这一问题,评估液压破裂对饮水资源的潜在影响,包括放射性。2014年末,EPA研究的初稿将会公布,公开征求公众意见和同行评议,EPA国家风险管理研究实验室水质管理部部长

血癌。镭也会放射 $\gamma$ 射线,外照射可能增加全身的癌症风险。镭-226和镭-228的半衰期分别为1600年和5.75年。人们已知,镭会在无脊椎动物、软体动物和淡水鱼中积蓄,在它们体内代替骨骼中的钙。最终,镭衰变为氡;氡-222的半衰期为3.8天。

从地理化学角度而言,氡和镭的表现不同。氡是一种惰性气体,所以不会与其他元素反应,通常在井口随甲烷从采出水中分离出来。尽管没有经验数据,但天然气行业并不担心消费者会接触到极大量的氡,部分原因在于氡的半衰期很短,以及大部分的氡都在井口被排放到周围空气中。

和采出水的想法是根本不可能的”

目前,很多有关水力压裂环境效应的研究都有缺乏实际处理实践的问题,Engle说。他认为这个问题的原因在于行业和科学家之间缺乏信任以及这些信息通常都是生产商专有的。但Swann说与密西西比州的生产商合作与以往不同。“小规模的生产商很愿意合作和提供协助,并承担费用,”他说。“只有通过他们的帮助,我们才能收集到那么多田地和油井的样本。”

2013年12月刊出的研究表明,可能有一种新的方法处理水力压裂废水中的放射性。Vengosh和同事们把各种比例的回流水和酸性矿场废水

(AMD)结合起来,研究后者作为水力压裂水源的可能性。AMD——开采区和其他接纳区的酸性渗滤液——在一些地区是一种重要的水中污染物。实验室研究显示,回流水和AMD的混合液会使回流中的NORM大量沉淀析出,余下的水中镭的水平接近EPA饮用水标准。

作者表示,放射性析出物可以用非放射性的废水稀释至市适合镇填埋场处理的水平。如果这适用于工业规

模,Vengoshi说,那这种方法不仅是对AMD的合理使用,而且可以在水力压裂作业中降低对淡水的需求,管理不可避免的放射性废物。

类似的研究为钻井的结局提供了启发。但目前对于放射性水力压裂废物在环境中归趋的了解尚不全面,因此无法对其管理作出妥善的决定。而且即使马塞勒斯的水力压裂作业一夜之间全部停止,有关放射性的疑问和潜在问题仍然不会消失。“一旦把水

力压裂液排放到环境中,就会有放射性遗留下来,” Vengoshi说。

Valerie J. Brown, 定居于俄勒冈,自1996年起为EHP撰文。2009年她以表观遗传性方面的写作获得了环境记者协会的杰出释义性报道奖。

译自EHP 122(2):A50-A55 (2014)  
翻译:汪源

\*本文参考文献请浏览英文原文  
[原文链接](#)

<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.122-A50>

## 孟紫强教授关于“沙尘天气对居民健康影响”的研究成果获得中央重视

山西大学环境医学与毒理学研究所孟紫强教授领衔团队在“沙尘天气对居民健康影响”领域做了大量卓有成效的研究工作。其先后有7篇关于沙尘天气与健康的研究论文分别在《环境与职业医学》和《环境与健康展望》(中文版)杂志刊发。新华社记者基于孟教授的研究,写了相关报道。中央领导和国家卫生计生委领导高度重视沙尘对我国居民的健康影响,对报道做了批示,这一重要批示使得相关研究成果向转化为保护群众健康的实际行动或政策前进了一步。据此,中国疾病预防控制中心已定于2015年1月21~22日召集国内有关专家在兰州召开“沙尘天气频发区沙尘对居民健康影响专家专题研讨会”,进一步探讨和跟踪沙尘天气对群众健康影响的研究,并就此提出相关对策和建议。我们相信在业内各方专家的共同努力下,我国的空气污染问题能寻找到较快、较好的解决办法。

孟教授研究团队发表在我刊及《环境与职业医学》的沙尘天气对居民健康影响的系列文章:

- [1] 孟紫强. 沙尘暴对健康的影响及防护. 环境与健康展望(中文版), 2010, 118(2C): 2.
- [2] 杨振华, 孟紫强, 张全喜. 沙尘天气可吸入颗粒物对气管炎门诊就诊数的影响. 环境与职业医学, 2013, 30(2): 88-92.
- [3] 孟紫强, 张剑, 杨振华, 等. 沙尘天气细颗粒物对呼吸及心血管系统疾病日门诊人数的影响. 环境与职业医学, 2008, 25(2): 225-231.
- [4] 杨振华, 孟紫强, 潘竞界, 等. 沙尘暴多发地区人群呼吸与循环等系统疾病的现患调查. 环境与职业医学, 2008, 25(1): 8-12.
- [5] 孟紫强, 卢彬, 张剑. 沙尘天气颗粒物对呼吸与心血管系统疾病日入院人数的影响. 环境与职业医学, 2008, 25(1): 1-7.
- [6] 孟紫强, 张剑, 卢彬, 等. 沙尘天气细颗粒物对高血压日门诊人数的影响. 环境与职业医学, 2007, 24(5): 473-480.
- [7] 孟紫强, 张全喜, 耿红. 沙尘暴细颗粒物致大鼠肺泡巨噬细胞DNA损伤. 环境与职业医学, 2006, 23(3): 185-188.